

НЕКОТОРЫЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
СТАНЦИОННЫХ ОДНОФАЗНЫХ
ДВУХОБМОТОЧНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

И. Д. КУТЯВИН, В. П. КРАСНОВ и Г. В. ДЕЛЬ

Технико-экономические исследования оптимальных размеров и параметров можно производить путем минимизации выражения затрат [1], учитывающего расходы на изготовление и эксплуатацию трансформатора и капиталовложения на создание добавочной мощности в системе (с учетом топливной базы) для покрытия потерь в трансформаторе.

$$Z = (A_1 + DB^2)Q_c + (\beta A_2 + \varepsilon \Delta_1^2)Q_{M_1} + (\beta A_2 + \varepsilon \Delta_2^2)Q_{M_2}. \quad (1)$$

Исследование затрат в общем виде очень сложно, поэтому в данной статье приводятся результаты численного исследования, полученные на ЭЦВМ для трансформаторов со стержневым и броневым сердечниками (рис. 1).

Принятые обозначения:

h — высота обмотки, см,

l_u — изоляционное расстояние от обмотки до ярма, см,

H — высота окна сердечника, см,

d — диаметр стержня, см,

x_1 и x_2 — радиальная ширина обмоток высшего (ВН) и низшего (НН) напряжения, см,

y_1 и y_2 — высота катушек обмоток ВН и НН, см,

δ_1 и δ_2 — высота радиальных охлаждающих каналов между катушками обмоток ВН и НН с учетом изоляции провода, см,

σ_1 и σ_2 — плотность теплового потока с поверхности обмотки ВН и НН вт/см²,

ρ_m — удельное сопротивление проводника ом, см,

δ_{02} — изоляционное расстояние между обмоткой НН и стержнем, см,

δ_{12} — изоляционное расстояние между обмотками ВН и НН, см,

δ_{11} — изоляционное расстояние между обмотками ВН, см,

δ_{10} — изоляционное расстояние между обмоткой ВН и стержнем, см,

κ_1 и κ_2 — коэффициент заполнения медью сечения обмотки ВН и НН,

Δ_1 и Δ_2 — плотность тока в обмотке ВН и НН а/см²,
 q_{M1} и q_{M2} — площадь сечения обмотки ВН и НН, см²,
 q_c — площадь сечения стали стержня, см²,
 k_c — коэффициент заполнения сталью площади сечения стержня
 m_1 и m_2 — число параллельных проводников в обмотке ВН и
 число параллельных проводников на заход обмотки НН,
 i_1 и i_2 — толщина изоляции на две стороны проводников обмот-
 ки ВН и НН, см,
 n_2 — число заходов обмотки НН,
 $k_{я}$ — коэффициент увеличения сечения ярма,
 n_c ; n_d ; n_σ — переходные коэффициенты от сердечника стерж-
 невого типа к броневому,
 l_c — длина стали сердечника, приведенная к площади сечения
 стержня,
 l_{M1} и l_{M2} — длина среднего витка обмоток ВН и НН, см,
 Q_M — вес материала обмоток, кг,
 Q_c — вес стали сердечника, кг,
 γ_M и γ_c — плотность проводникового материала и стали сердеч-
 ника, кг/см³,
 k_x и k_y — коэффициенты, учитывающие закрытие поверхностей
 обмотки изоляционными прокладками,
 f — чистота сети, гц,
 B — индукция в стержне,
 I_{H1} и I_{H2} — номинальные токи обмоток ВН и НН,
 C — постоянная.

Обозначения остальных коэффициентов взяты из [1].

Для составления расчетных уравнений были получены следующие зависимости [1; 2; 4]

$$H = h + 2l_u; \quad (2)$$

$$l_{M1} = \pi(d + x_2 + 2x_2 + 2\delta_{02} + 2\delta_{12}); \quad (3)$$

$$l_{M2} = \pi(d + x_2 - 2\delta_{02}); \quad (4)$$

$$q_{M1} = \frac{k_1 x_1 y_1 h}{y_1 + \delta_1}; \quad q_{M2} = \frac{k_2 x_2 y_2 h}{y_2 + \delta_2}, \quad (5)$$

где $k_1 = \frac{I_{H1}}{I_{H1} + m_1 i_1 y_1 \Delta_1}; \quad k_2 = \frac{I_{H2}}{I_{H2} + m_2 i_2 y_2 \Delta_2}; \quad (6)$

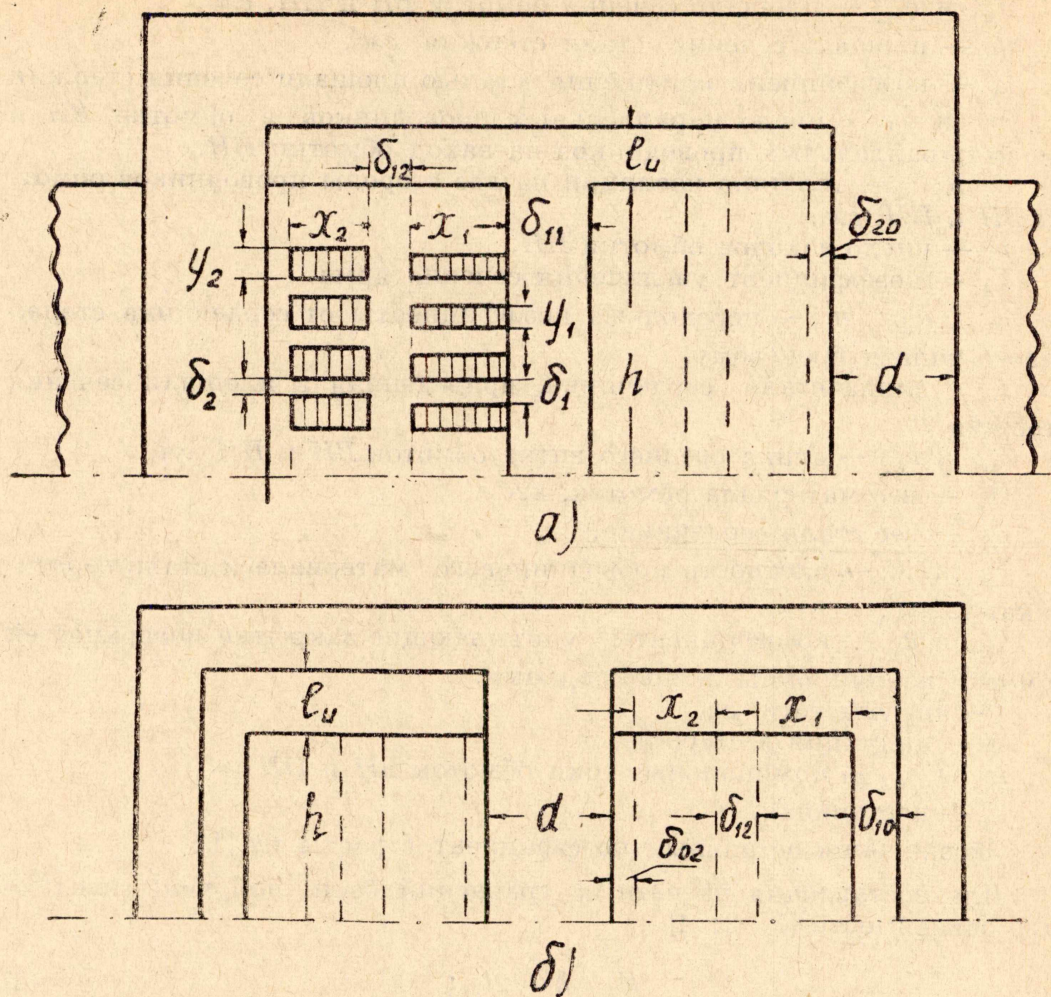
$$l_c = n_c (h + 2l_u) + k_{я} [2n_\sigma (x_1 + x_2 + \delta_{02} + \delta_{12} + \delta_{10} + 0,5\delta_{11}) + n_d d]; \quad (7)$$

$$q_c = k_c \frac{\pi d^2}{4}; \quad (8)$$

$$Q_{M1} = n_\sigma \gamma_M q_{M1} l_{M1} \cdot 10^{-3}; \quad Q_{M2} = n_\sigma \gamma_M q_{M2} l_{M2} \cdot 10^{-3}; \quad (9)$$

$$Q_M = Q_{M1} + Q_{M2}; \quad (10)$$

$$Q_c = \gamma_c l_c q_c \cdot 10^{-3}. \quad (11)$$



Р и с. 1.

Уравнения теплового баланса катушки на погонный сантиметр среднего витка обмоток

$$\left. \begin{aligned} x_1 k_{\Pi_1} + y_1 &= \alpha_1 \Delta_1^2 x_1 y_1 k_1 \\ x_2 k_{\Pi_2} + y_2 &= \alpha_2 \Delta_2^2 x_2 y_2 k_2 \end{aligned} \right\}; \quad (12)$$

где $k_{\Pi_1} = \frac{k_{x_1}}{k_{y_1}}; k_{\Pi_2} = \frac{k_{x_2}}{k_{y_2}}; \alpha_1 = \frac{\rho_m}{2\sigma_1 k_{y_1}}; \alpha_2 = \frac{\rho_m}{2\sigma_2 k_{y_2}}.$ (13)

Мощность трансформатора

$$S = K \Delta_1 q_{M_1} q_c = K \Delta_2 q_{M_2} q_c, \quad (14)$$

где

$$K = 4,44 f B n_{\sigma} \cdot 10^{-7}. \quad (15)$$

Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания, в относительных единицах

$$u_p = \frac{6,8 \Delta_2 q_{M_2} d_{12} a_p}{k_c B h d^2}, \quad (16)$$

где

$$d_{12} = d + 2x_2 + 2\delta_{02} + \delta_{12}, \quad (17)$$

$$a_p = \frac{x_1 + x_2 + 3\delta_{12}}{3}. \quad (18)$$

Равенство намагничивающих сил обмоток

$$\frac{k_1 x_1 y_1 \Delta_1}{y_1 + \delta_1} = \frac{k_2 x_2 y_2 \Delta_2}{y_2 + \delta_2}. \quad (19)$$

Поскольку число заходов обмотки HH целое, можно воспользоваться уравнением намагничивающей силы витка

$$I_{H_2} W_{K_2} = k_2 x_2 y_2 \Delta_2, \quad \text{где } W_{K_2} = \frac{1}{n_2}. \quad (20)$$

Итак, имеется шесть основных уравнений (12; 14; 16; 19 и 20), связывающих девять неизвестных (W_{K_2} ; x_1 ; x_2 ; y_1 ; y_2 ; Δ_1 ; Δ_2 ; d ; h). Исследование затрат (1) удобно проводить, приняв за независимые переменные размер y_2 плотность тока Δ_1 и число витков в катушке обмотки HH .

В результате совместного решения указанной системы уравнений, для определения размеров трансформатора получим следующие формулы:

$$M = \frac{k_{\Pi_1} m_1 i_1}{I_{H_1}} - \alpha_1 \Delta_1; \quad (21)$$

$$y_1 = \frac{\left(\frac{k_{\Pi_1}}{\Delta_1} + \delta_1 M \right) + \sqrt{\left(\frac{k_{\Pi_1}}{\Delta_1} + \delta_1 M \right)^2 + \frac{4k_{\Pi_1} \delta_1}{\Delta_1} \left(-M - \frac{y_2 + \delta_2}{I_{H_2} W_{K_2}} \right)}}{2 \left(-M - \frac{y_2 + \delta_2}{I_{H_2} W_{K_2}} \right)}; \quad (22)$$

$$x_1 = \left[\frac{\alpha_1 \Delta_1 I_{H_2} W_{K_2} (y_1 + \delta_1)}{y_2 + \delta_2} - y_1 \right] \frac{1}{k_{\Pi_1}}; \quad (23)$$

$$N = \frac{y_2}{k_{\Pi_2} W_{K_2}} + m_2 i_2; \quad (24)$$

$$\Delta_2 = \frac{N + \sqrt{N^2 + \frac{4\alpha_2 I_{H_2}^2}{k_{\Pi_2} y_2}}}{2 \frac{\alpha_2 I_{H_2}}{k_{\Pi_2}}}; \quad (25)$$

$$x_2 = \frac{\alpha_2 \Delta_2 I_{H_2} W_{K_2} - y_2}{k_{\Pi_2}}; \quad (26)$$

$$a'_p = x_1 + x_2 + 3\delta_{12}; \quad (27)$$

$$v = 2x_2 + 2\delta_{02} + \delta_{12}; \quad (28)$$

$$d = \frac{a'_p + \sqrt{(a'_p)^2 + \frac{4Bk_c u_p}{2,26 I_{H_2} W_{K_2}} (y_2 + \delta_2) a'_p v}}{2 \frac{Bk_c u_p}{2,26 I_{H_2} W_{K_2}} (y_2 + \delta_2)}; \quad (29)$$

$$h = \frac{S(y_2 + \delta_2)}{0,17436 \cdot 10^{-8} I_{H_2} W_{K_2} k_C B d^2 n_\sigma} \quad (30)$$

Для проведения исследований взято:

$$\kappa_{x_1} = \kappa_{x_2} = 0,7; \quad \kappa_{y_1} = \kappa_{y_2} = 0,9; \quad \sigma_1 = \sigma_2 = 0,15; \quad \kappa_M = \kappa_H = 1;$$

$$\rho = 2,14 \cdot 10^{-6}; \quad \gamma_C = 7,65; \quad \gamma_M = 8,9; \quad \alpha_M = 0,24 \cdot 10^{-6}; \quad \alpha_C = 0,6 \cdot 10^{-11};$$

$$P_H = 0,125; \quad P_a = 0,06; \quad A = 0,1295; \quad \alpha_p = 0,0193; \quad \kappa_C = 0,8;$$

$$D = 0,159 \cdot 10^{-9}; \quad i_2 = 0,055; \quad \kappa_{я} = 1,05; \quad \delta_2 = 0,655; \quad \delta_{02} = 1,5;$$

$$\varepsilon = 0,588 \cdot 10^{-5}; \quad u_p = 0,105; \quad \kappa_T = 0,7;$$

для 110 кв: $i_1 = 0,14; \quad \delta_1 = 0,94; \quad \delta_{12} = 5; \quad \delta_{10} = 9; \quad \delta_{11} = 6;$
 $\beta = 2,8;$

для 220 кв: $i_1 = 0,2; \quad \delta_1 = 1,4; \quad \delta_{12} = 11; \quad \delta_{10} = 12; \quad \delta_{11} = 14; \quad \beta = 3;$

для трансформаторов со стержневым сердечником $n_C = 2; \quad n_\sigma = 2; \quad n_d = 3,6;$

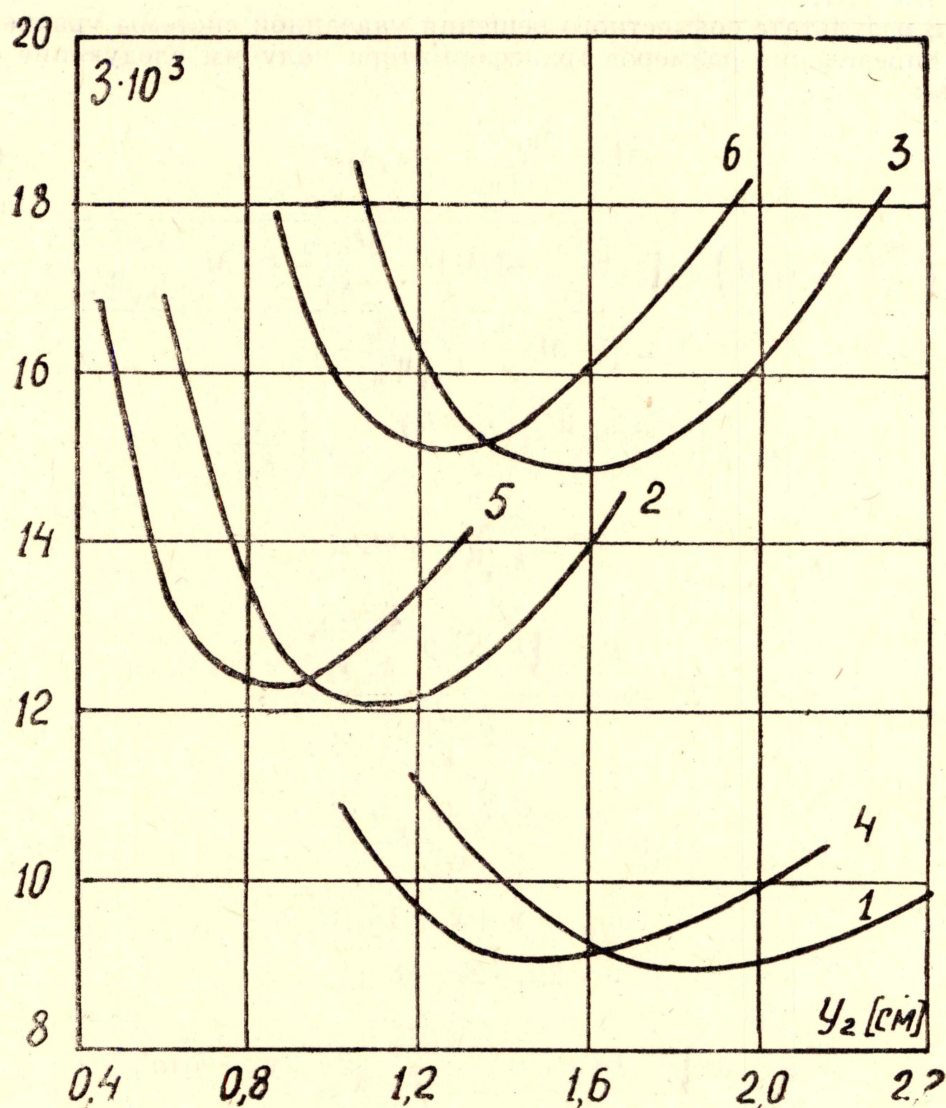


Рис. 2.

для трансформаторов с броневым сердечником $n_c = 2,05$; $n_o = 1$; $n_d = 1,8$, остальные данные приведены в табл. 1.

$U_{\text{вн}}, \text{кВ}$	$S_{\text{н}}, \text{МВА}$	$I_{\text{н1}}, \text{а}$	m_1	$I_{\text{н2}}, \text{а}$	m_2	n_2
1	2	3	4	5	6	7
110	40	573	6	2900	28	1
	60	860	8	4350	44	2
	80	1046	10	5800	56	2
220	40	286	3	2900	28	1
	60	430	4	4350	44	2
	80	573	6	5800	56	2
	120	860	8	6000	44	4

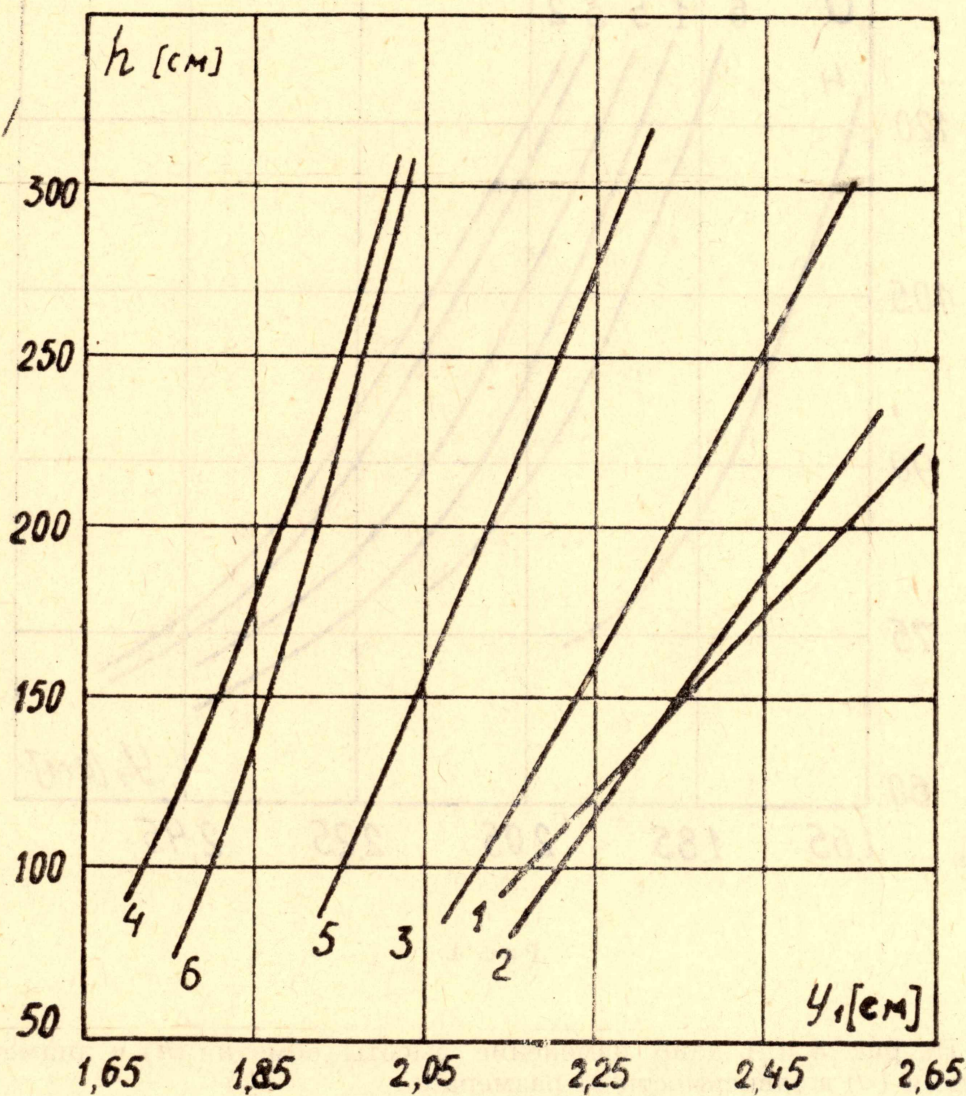


Рис. 2.

Исследования проводились для изменения Δ_1 с шагом $2,5 \text{ а/см}^2$ и y_2 с шагом $0,05 \text{ см}$. Некоторые результаты исследования приведены на рис. 2—7.

На рис. 2 показана зависимость затрат (1) от величины y_2 при постоянной плотности тока Δ_1 для трансформаторов со стержневым (кривые 1, 2 и 3) и броневым (кривые 4, 5 и 6) сердечником, мощностью 40, 60 и 80 мва. Характер изменения затрат почти не зависит от формы сердечника. Минимальные затраты на трансформатор со стержневым сердечником несколько меньше, и разность в затратах растет с увеличением мощности трансформатора. Следует отметить, что величина y_1 в точке минимума для трансформаторов со стержневым сердечником получается больше стандартной (2,2 см). Снижение y_1 до стандартного приводит к увеличению затрат до величины таковых для трансформатора с броневым сердечником.

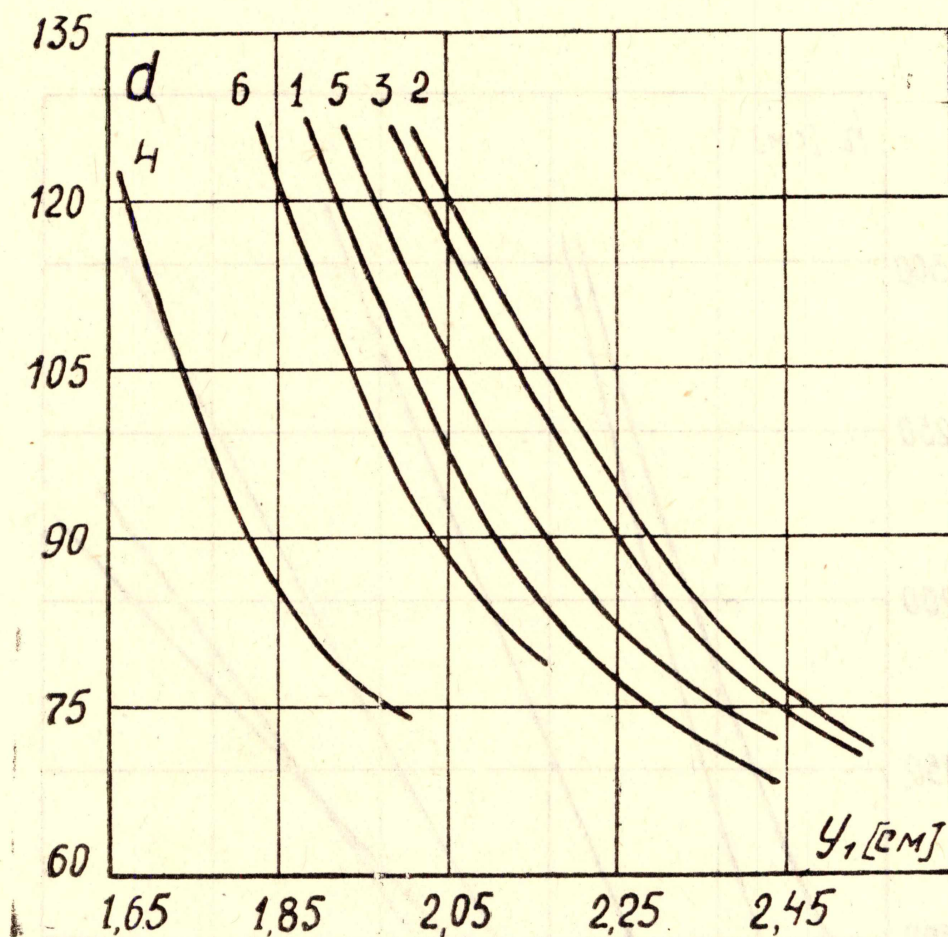


Рис. 4.

На рис. 3 и 4 дано изменение высоты обмотки (h) и диаметра стержня (d) в зависимости от размера y_1 .

Одним из основных требований, предъявляемых к трансформатору, является механическая прочность обмоток при коротких замыканиях.

Для расчета механических напряжений, возникающих в обмотках от действия радиальных сил при коротком замыкании, можно воспользоваться выражениями [2, 3]:

$$\sigma_p = \frac{C \Delta^2 q_m d_{12}}{h u_p^2}, \quad (31)$$

где $C = 19,7 \cdot 10^{-8}$. (32)

На рис. 5 показан результат расчета σ_p для разных значений y_1 при постоянной плотности тока Δ_1 , соответствующей точке минимальных затрат, обозначения кривых на рис. 3, 4 и 5 те же, что и на рис. 2. Для трансформатора 80 мва со стержневым сердечником на рис. 6 приведен результат исследования минимальных затрат при разных коэффициентах заполнения сталью площади сечения стержня (κ_c), индукции в сердечнике (B) и числа заходов винтовой обмотки $\left(\frac{1}{W_{k2}}\right)$.

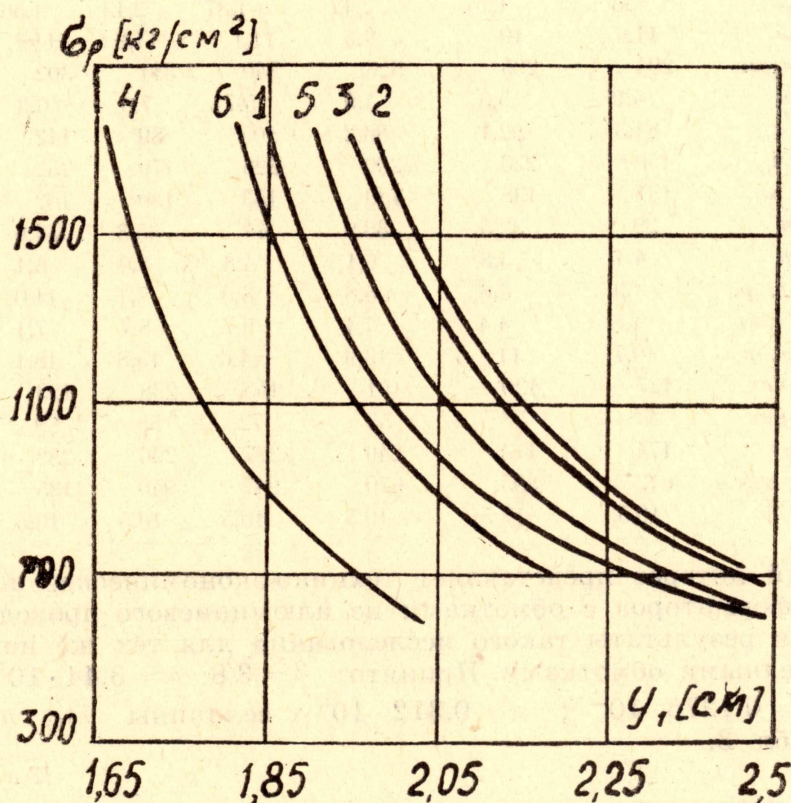


Рис. 5.

Представляет интерес наличие минимума затрат от числа заходов винтовой обмотки $\left(\frac{1}{W_{k2}}\right)$. Из рисунка видно, что при изменении числа заходов от 1 до 2 затраты меняются незначительно, но здесь следует отметить, что при меньшем значении $\left(\frac{1}{W_{k2}}\right)$ получается боль-

шая величина y_2 в точке наименьших затрат. Например, для рассмотренного случая при $\frac{1}{W_{к2}} = 2$; $y_2 = 2,25$ см, а при $\frac{1}{W_{к2}} = 1$, $y_2 = 3,9$ см.

При исследовании трансформаторов с ВН 220 кВ, зависимости аналогичны.

В табл. 2 даны основные величины в точке наименьших затрат для трансформаторов со стержневым (I) и броневым (II) сердечниками, напряжения ВН 220 кВ.

Таблица 2

№ п. п.	S_n , мва тип сердечника	40		60		80		120
		I	II	I	II	I	II	I
1	$W_{к2}$	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,25
2	y_2 см	2,9	2,5	1,83	1,43	1,73	2,0	0,725
3	Δ_1 а/см	388	417	388	388	388	417	324
4	y_1 см	36	1,74	2,17	1,87	2,13	1,56	2,8
5	x_1 см	11,6	10	9,5	11,1	14,2	11,7	11,3
6	Δ_2 а/см	294	295	326	340	311	302	424
7	x_2 см	4,9	5,5	4,9	5,7	7,0	6,3	5,5
8	d см	84,3	92,1	86,2	105	89	112	101
9	h см	150	223	200	226	179	252	258
10	d_1 см	131	138	130	153	130	162	151
11	Q_c т	29	32,5	33,9	44	35,3	54,6	56
12	Q_m т	4,4	3,8	6,1	4,8	8,0	6,1	10,3
13	Z_c т. р.	59	6,6	6,8	8,9	7,1	11,0	11,3
14	Z_m т. р.	4,8	4,4	7,1	5,7	8,7	7,1	12,1
15	Z т. р.	10,7	11	13,9	14,6	15,8	18,1	23,4
16	P_m кВт	127	120	191	155	238	193	328
17	P_c кВт	47	53	55	72	58	89	91
18	P кВт	174	173	246	227	296	282	419
19	σ_p кг/см	612	805	670	947	940	1135	734
20	u_p %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5

Особый интерес представляет технико-экономическое исследование трансформаторов с обмотками из алюминиевого провода. Ниже приводятся результаты такого исследования для тех же номиналов, что и с медными обмотками. Принято: $\beta = 3,8$; $\rho = 3,44 \cdot 10^{-6}$; $\gamma_m = 2,7$; $\alpha = 0,1275 \cdot 10^{-5}$; $\varepsilon = 0,312 \cdot 10^{-4}$, величины m_1 ; m_2 и n_2 даны в табл. 3.

Таблица 3

S_n , мва	U_n , кВ	m_1	m_2	n_2	U_n , кВ	m_1	m_2	n_2
40	110	8	56	2	220	5	56	2
60	110	12	84	2	220	8	84	2
80	110	16	112	4	220	12	112	4

Характер изменения затрат и размеров трансформаторов с алюминиевыми обмотками тот же, что и для трансформаторов с обмоткой из меди.

На рис. 7 приведена зависимость σ_p от y_2 при оптимальном значении Δ_2 , для трансформаторов ВН 110 кВ (кривые 1, 2 и 3) и 220 кВ

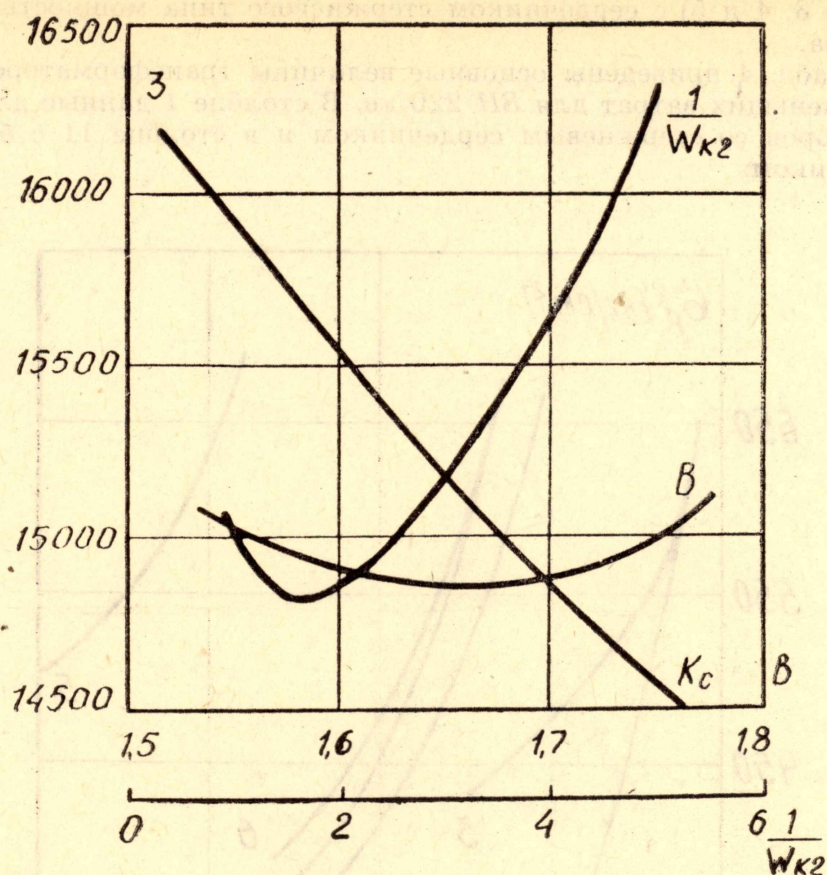


Рис. 6.

Таблица 4

№ п. п.	S_n , мва тип. серд.	40		60		80	
		I	II	I	II	I	II
1	W кг	0,5	0,5	0,5	0,5	0,25	0,25
2	y_2 см	1,32	1,00	2,1	1,65	1,07	0,8
3	Δ_1 а/см ²	357	357	365	369	387	387
4	y_1 см	2,18	1,85	2,18	1,75	2,1	1,82
5	x_1 см	12,5	14,3	14,1	15,6	15,9	18,0
6	Δ_2 а/см ²	294	314	254	265	308	336
7	x_2 см	5,26	6,16	6,37	7,29	5,92	6,93
8	d см	79,2	96,8	89,2	108	95	116
9	h см	189	212	208	235	230	258
10	d_1 см	127	148	141	164	148	173
11	Q_c т.	27,6	35,7	38,2	49,1	46,5	60,7
12	Q_m т.	1,53	1,18	2,15	1,68	2,34	1,79
13	z_c т. р.	5,56	7,2	7,71	9,9	9,38	12,2
14	z_m т. р.	5,97	4,8	7,7	6,2	10,22	8,3
15	z т. р.	11,53	12,0	15,41	16,1	19,6	20,5
16	P_m кет	213	173	271	220	371	304
17	P_c кет	45	58	62	80	76	99
18	P кет	258	231	333	300	447	403
19	σ_p кг/см ²	486	670	598	854	703	997
20	u_p %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5

(кривые 3, 4 и 5) с сердечником стержневого типа мощностью 40, 60 и 80 мва.

В табл. 4 приведены основные величины трансформаторов в точке наименьших затрат для ВН 220 кВ. В столбце 1 данные для трансформаторов со стержневым сердечником и в столбце 11 с броневым сердечником.

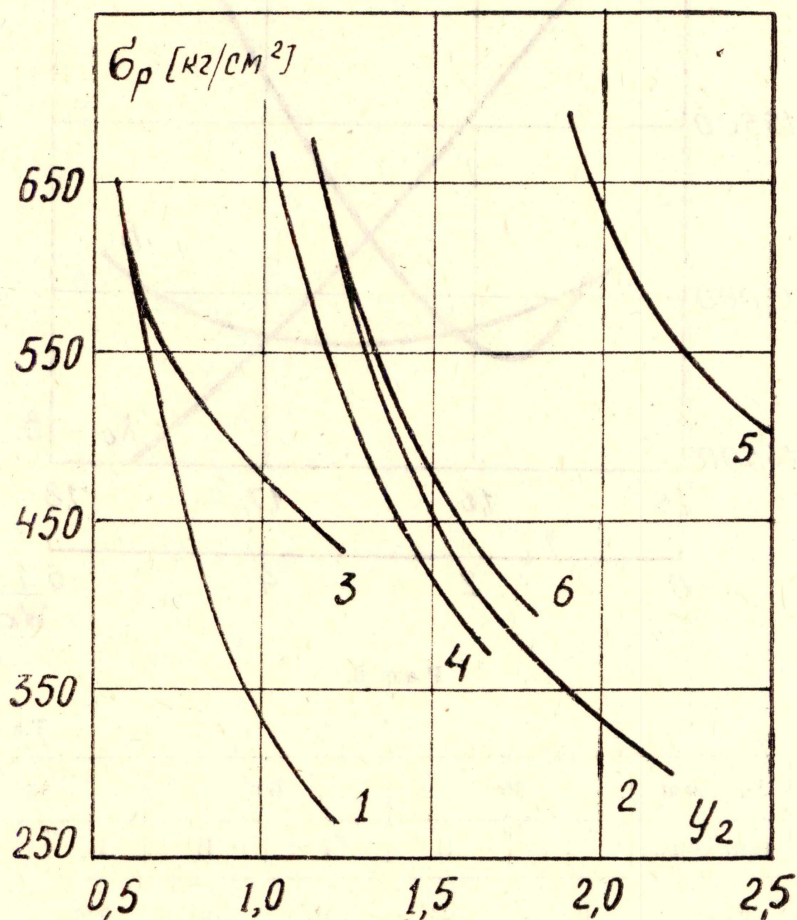


Рис. 7.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кутявин И. Д. К определению оптимальных размеров трехфазных двухобмоточных трансформаторов. Том 130. «Известия» ТПИ, 1964.
2. Тихомиров П. М. Расчет трансформатора. Госэнергоиздат, 1962.
3. Петров Г. Н. Трансформаторы. ОНТИ, Энергоиздат, 1934.
4. Кутявин И. Д., Дель Г. В., Краснов В. П. К технико-экономическому определению размеров однофазных двухобмоточных трансформаторов. Том 130, «Известия ТПИ», 1964.